



Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014-2020

Skládkový workshop Liberec-Žitava 2016

Skládka jako poslední možnost

Aktuální otázky

vyplývající z hierarchie nakládání s odpady

3.-4. listopadu 2016



Deponieworkshop Liberec-Zittau 2016

Deponie als letzte Möglichkeit

Aktuelle Fragen,

die sich aus der Abfallhierarchie ergeben

03.-04. November 2016

12. Skládkový workshop Liberec-Žitava

Skládka jako poslední možnost

Aktuální otázky vyplývající z hierarchie nakládání s odpady

12. Deponieworkshop Liberec-Zittau

Deponie als letzte Möglichkeit

Aktuelle Fragen, die sich aus der Abfallhierarchie ergeben

Podpora

Tato akce je podpořena z prostředků Evropské unie prostřednictvím Programu spolupráce Česká republika-Svobodný stát Sasko 2014-2020 – číslo projektu 100246598.

Förderung

Diese Veranstaltung wird durch das SN-CZ 2014-2020 - Programm der EU zur Förderung der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit zwischen dem Freistaat Sachsen und der Tschechischen Republik gefördert – Projektnr.: 100246598.

odborný editor: Lukáš Zedek

technický editor: Kamil Nešetřil

překlady provedl: Sven Dietrich

Sborník byl připraven s využitím typografického systému \LaTeX .

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Účinnost evropských předpisů | 7 |
| <i>Havelka, P.</i> Odpadové hospodářství v ČR ve světle vyhlášené evropské strategie | 9 |
| <i>Stock, U.; Bittrich, S.</i> Požadavky na zpracování odpadů, především diskuse o spalování odpadů proti mechanicko-biologickému zpracování odpadů z německého pohledu | 11 |
| <i>Hráská, D.</i> Způsoby energetického využívání odpadů | 25 |
| <i>Witkowski, W.; Beyer, G.</i> Plánování, stavba a zprovoznění zařízení pro zpracování odpadu s kompostárnou v Marszowě (Polsko) | 31 |
| Využití stavebních materiálů pro stavbu skládek | 33 |
| <i>Egloffstein T.; Sehrbrock, U.</i> Průkazní zkoušky přírodních, minerálních stavebních materiálů – Požadavky a jejich praktické prosazování v Německu | 35 |
| <i>Sandig, F.; Al-Akel, S.; Thiele, R.; Engel, J.</i> Aplikace technických rekultivačních substrátů - možnosti a hranice | 39 |
| <i>Hrabčák, M.</i> Štvrtý rozmer skládky | 55 |
| <i>Schneider, P.; Müller, M.; Hebner, A.; Kapielski, K.; Schrickel, M.; Fabian, H.</i> Možnosti alternativní izolace skládky pomocí sekundárních minerálních stavebních hmot v tuzemsku a v zahraničí | 63 |
| Aplikovaná informatika a měřicí technika | 77 |
| <i>Dunger, V.; Müller, M.; Winter, C.; Winter, J.</i> Hydrologie zajištění povrchu v Sasku a změny klimatu | 79 |
| <i>Datel, J. V.</i> Zásady geotechnického a environmentálního monitoringu odkališť | 93 |
| <i>Weber K.</i> Automatizovaný monitoring skládky během fáze následné péče | 111 |

| | |
|---|------------|
| <i>Kast, G.</i> Měření objemového obsahu vody při využití kontinuálních a diskontinuálních metod měření v hydrologické vrstvě skládky v Bavorsku | 117 |
| Techniky následné péče o skládky | 119 |
| <i>Drews, R.</i> Nákladově efektivní a nízkoúdržbové systémy odvodnění povrchů skládek s přihlédnutím ke specifickým požadavkům hydrologické vrstvy. | 121 |
| <i>Beck-Broichsitter, S.; Fleige, H.; Horner, R.</i> Dlouhodobá účinnost dočasného minerálního zakrytí povrchu | 143 |
| <i>Steinbrecht, D.; Rickert, I.</i> Likvidace a energetické využívání skládkových plynů | 153 |
| <i>Nešetřil, K.</i> Informační systém pro monitoring skládek | 163 |
| Aplikovaná geologie a další témata | 165 |
| <i>Zeman, J.</i> Geochemie složitých interakcí odpadů a infiltračních vod na skládkách | 167 |
| <i>Hrabal, J.; Kovářová, K.; Ambrožová, V.</i> Čištění skládkových výluhů kombinovanou membránovou technologií s použitím bio- logických systémů předčištění | 179 |
| <i>Gerth, A.; Hebner, A.; Kopielski, K.; Schneider, P.</i> Následné využití lokality skládky Gò Cát v Ho Či Minově městě | 187 |
| <i>Clemenz, P.; Weber, I.; Dedek, M.; Pabel, R.; Schoenherr, J.I.; Dunger, V.; Schulz, R.; Engel, J.</i> Vývoj environmentálních inženýrských postupů pro udržitelné využití půd | 199 |
| <i>Pelantová, V.</i> Problematika černých skládek | 207 |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Auswirkung von EU-Richtlinien | 7 |
| <i>Havelka, P.</i> Abfallwirtschaft in der Tschechischen Republik angesichts der erklärten europäischen Strategie | 9 |
| <i>Stock, U.; Bittrich, S.</i> Anforderungen an die Abfallbehandlung, insbesondere die Diskussion um Abfallverbrennung kontra mechanisch-biologische Abfallbehandlung aus deutscher Sicht | 11 |
| <i>Hráská, D.</i> Möglichkeiten einer energetischen Abfallnutzung | 25 |
| <i>Witkowski, W.; Beyer, G.</i> Planung, Bau und Inbetriebnahme von Abfall-aufbereitungsanlagen und die Abfallanlage mit Kompostierung in Marszow (Polen) | 31 |
| Verwendung von Baustoffen im Deponiebau | 33 |
| <i>Egloffstein T.; Sehrbrock, U.</i> Eignungsnachweise nach BQS für natürliche mineralische Baustoffe – Anforderungen und praktische Umsetzung | 35 |
| <i>Sandig, F.; Al-Akel, S.; Thiele, R.; Engel, J.</i> Anwendungen für technische Rekultivierungs-Substrate – Möglichkeiten und Grenzen | 39 |
| <i>Hrabčák, M.</i> Die vierte Dimension einer Deponie | 55 |
| <i>Schneider, P.; Müller, M.; Hebner, A.; Kopielski, K.; Schrickel, M.; Fabian, H.</i> Möglichkeiten alternativer Deponieabdichtungen mit mineralischen Ersatzbaustoffen im In- und Ausland | 63 |
| Angewandte Informatik und Umwelt-Messtechnik | 77 |
| <i>Dunger, V.; Müller, M.; Winter, C.; Winter, J.</i> Der Wasserhaushalt von Oberflächensicherungen Sachsens im Klimawandel | 79 |
| <i>Datel, J. V.</i> Prinzipien des geotechnischen Monitorings und Umweltmonitorings von Klärteichen . | 93 |
| <i>Weber K.</i> Automatisierte Deponieüberwachung in der Nachsorgephase | 111 |

| | |
|--|------------|
| <i>Kast, G.</i> Zur Messung des volumetrischen Bodenwassergehaltes bei Einsatz von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Messmethoden in einer Wasserhaushaltsschicht einer Deponie in Bayern | 117 |
| Umwelttechnik bei der Nachsorge von Deponien | 119 |
| <i>Drews, R.</i> Kostengünstige und nachsorgearme Oberflächenentwässerungseinrichtungen auf Deponien bei Berücksichtigung der besonderen Anforderungen einer Wasserhaushaltsschicht | 121 |
| <i>Beck-Broichsitter, S.; Fleige, H.; Horner, R.</i> Langzeitwirkung einer temporären mineralischen Oberflächenabdichtung | 143 |
| <i>Steinbrecht, D.; Rickert, I.</i> Entsorgung von und Energiegewinnung aus Deponiegasen | 153 |
| <i>Nešetřil, K.</i> Informationssystem für das Monitoring einer Deponie | 163 |
| Angewandte Geologie, Sonstiges | 165 |
| <i>Zeman, J.</i> Geochemie komplexer Wechselwirkungen des Abfalls und des Sickerwassers auf Deponien | 167 |
| <i>Hrabal, J.; Kovářová, K.; Ambrožová, V.</i> Reinigung des Deponiesickerwassers mit Hilfe einer kombinierten membranengestützten Technologie unter Anwendung biologischer Systeme der Vorbehandlung | 179 |
| <i>Gerth, A.; Hebner, A.; Kopielski, K.; Schneider, P.</i> Nachnutzung des Deponiestandortes Gò Cát in Ho Chi Minh City | 187 |
| <i>Clemenz, P.; Weber, I.; Dedek, M.; Pabel, R.; Schoenherr, J.I.; Dunger, V.; Schulz, R.; Engel, J.</i> Entwicklung umweltingenieurtechnischer Verfahren zur nachhaltigen Bodenressourcennutzung | 199 |
| <i>Pelantová, V.</i> Problematik der illegalen Abfallablagerung | 207 |

**Využití stavebních materiálů pro
stavbu skládek**

**Verwendung von Baustoffen im
Deponiebau**

Aplikace technických rekultivačních substrátů - možnosti a hranice

Anwendungen für technische Rekultivierungs-Substrate – Möglichkeiten und Grenzen

Friedmann Sandig¹; Said Al-Akel¹; Ralf Thiele¹; Jens Engel²

Abstrakt

V důsledku jednotné nové spolkové úpravy oblasti ochrany podzemních vod, skládek a ochrany půd vznikají jednotné úpravy pro velké toky minerálních odpadů. Stávající úpravy jednotlivých spolkových zemí ve vztahu ke kvótám recyklace a zhodnocování vyžadují urychlený zásah. Naléhavě řešit v následujících letech je potřeba především skládky tříd DK0 a DK1 za současně akutního nedostatku prostoru pro minerální odpady. Jako alternativní řešení jsou sledovány možnosti látkového zhodnocení materiálu na příkladu stavební sutě s vysokým podílem cihel, které v souladu se zákonnou předlohou vyhovuje aspektům ochrany životního prostředí a ochrany zdrojů cenných minerálních stavebních materiálů. V příspěvku je na základě rámcových podmínek představena aktuální a perspektivní potřeba množství a pedologické a půdně-mechanické požadavky na minerální sekundární stavební hmoty pro rekultivační vrstvy a zprostředkovány základní úvahy k výrobě alternativních substrátů. V příspěvku jsou představeny první výsledky výzkumů na typických materiálech, které se v praxi vyskytují a diskutovány plánované výzkumy pro pokračování odborných studií.

Kurzfassung

Durch die bundeseinheitliche Neuordnung für den Grundwasser-, Deponie- und Bundesbodenschutzbereich durch die Mantel-Verordnung entstehen einheitliche Regelungen für die großen Massenströme der mineralischen Abfälle. Die bestehenden Regelungen der Länder bezüglich der Recycling- und Verwertungsquoten erfordern ein schnelles Handeln. Insbesondere für Deponien der DK 0 und I entsteht für die nächsten Jahre ein hoher Handlungsbedarf bei momentan akutem Platzmangel für mineralische Abfälle. Als alternative Lösung werden Ansätze der Stoffverwertung an einem Beispiel eines Abbruchmaterials mit hohen Ziegelanteilen verfolgt, welche entsprechend der Gesetzesvorgabe den Aspekten des Umweltschutzes und der Ressourcenschonung wertvoller mineralischer Baustoffe gerecht wird. Der Beitrag stellt aufbauend auf rechtlichen Rahmenbedingungen den aktuellen und perspektivischen Mengenbedarf und die bodenkundlichen und bodenmechanischen Anforderungen an einen mineralischen Ersatzbaustoff für Rekultivierungsschichten vor und vermittelt die Grundidee zur Herstellung dieser alternativen Substrate. Es werden im Beitrag erste Ergebnisse aus Untersuchungen an praxistypischen Materialien präsentiert und die geplanten Untersuchungen zur Fortführung der Fachstudien zur Diskussion gestellt.

¹Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Karl-Liebknecht-Str. 132, 04277 Leipzig, friedmann.sandig@htwk-leipzig.de, said.al-akel@htwk-leipzig.de

²Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, D-01069; engel@htw-dresden.de

1 Hintergründe und Problemformulierung

1.1 Markt- und Rohstoffsituation in Deutschland

Deutschland ist einer der größten Verbraucher mineralischer Rohstoffe. Ein Großteil der Steine-und-Erden-Rohstoffe wird aus heimischen Lagerstätten gewonnen [1]. Die jährliche Fördermenge liegt in Deutschland auf Grundlagen der Rahmengesetzgebung des Bundes und der Landesgesetze bei über 500 Mio. t mineralische Rohstoffe, davon ca. 250 Mio. t Kiese und Sande. Nach dem Ende des Nutzungszeitraums werden mineralische Rohstoffe bzw. deren sekundäre Baustoffmassen als Deponiematerial abgelegt oder der Aufbereitung zugeführt. Allein in Sachsen sind jährlich über 4 Mio. t mineralische Abfälle zu entsorgen bzw. zu verwerten (Quelle: Statistisches Landesamt 2014). Über 2,5 Mio. t werden in Anlagen aufbereitet. Damit gelangen allein in Sachsen jährlich ca. 1,5 Mio. t auf Deponien und andere Tagebauflächen. Bei mineralischen Abfällen liegt die aktuelle Recyclingquote bei 59 %, davon für Bauschutt und Gemischen aus Ziegel, Beton, Keramik und Fliesen nur bei 35 %. In einigen Regionen Deutschlands ist aufgrund der verhältnismäßig starken Deponierungsquote ein Engpass bereits in wenigen Jahren für mineralische Bauabfälle zu erwarten. So wurden beispielsweise im Vogtlandkreis von 832.000 t mineralischen Abfällen 536.000 t in Deponien verfüllt und damit nur 36 % dieser gewaltigen Massenströme wiederaufbereitet.

Betrachtet man die bisherigen Recyclingverfahren, so werden ausschließlich Produkte (Schüttgüter) für den Straßen- und Wegebau, Erdbau und Deponiebau hergestellt. Diesen Bereich dominieren gegenwärtig vorwiegend Schüttgüter der Natursteinindustrie. Der Zugang von Recyclingmaterialien ist aufgrund von technischen und zulassungsrechtlichen Anforderungen nur bedingt möglich. Gleichzeitig ist das Ausschreibungsverhalten unzureichend auf Recyclingmaterial ausgerichtet. Die ingenieurmäßige Verantwortung für die nächsten Jahre liegt damit im Erkunden neuer Nutzungspotenziale für mineralische Abfallstoffe und der Entwicklung neuer Ersatzbaustoffe im Rahmen der aktuellen politischen Rahmengesetzgebung.

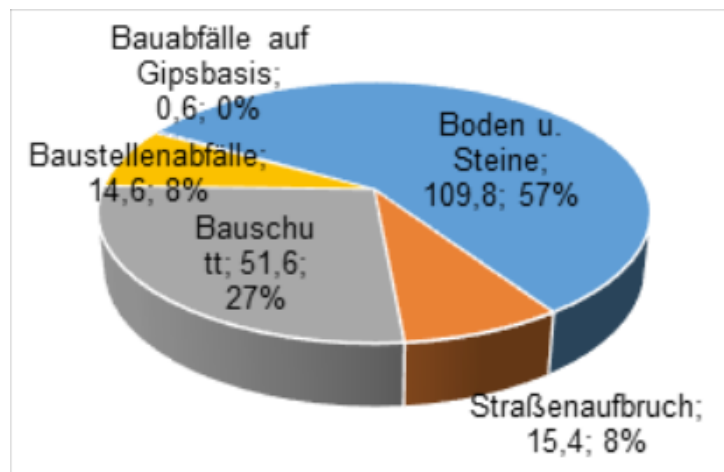


Abbildung 1: statistisch erfasste Bauabfälle 2012, Quelle: UBA, 9. Monitoring-Bericht der Bauwirtschaft

Geringe Verwertungspotenziale werden momentan für Bauschuttmassen mit hohen Ziegelanteilen erreicht (siehe Abb. 2). Diese auf Deponien anfallenden mineralischen Massen unterschiedlicher Güte und Zusammensetzung bieten jedoch interessante Möglichkeiten zur Wiedernutzung bei Anwendung bekannter Aufbereitungstechnologien. Der Haltbarkeitszeitraum von Mauerziegeln und -klinkern liegt im Allgemeinen über dem Nutzungszeitraum der Gebäude. Aufgrund ihrer mineralischen Struktur liegt es also nahe, Ziegelanteile in eine erneute Nutzung zu überführen. Aktuelle Nutzungspotenziale liegen z.B. in der Herstellung von Zuschlagstoffen

für die Beton- und Mörtelherstellung, als Füll- und Unterbaumaterial für Gehwege oder Terrassen, als Pflanzensubstrate oder Tennissand.



Abbildung 2: Ungebrochenes Bauschuttmaterial mit hohem Ziegelanteil auf einer Halde

1.2 Bedarf qualifizierten Deponieraumes für mineralische Baustoffe

Der Bedarf an qualifiziertem Deponieraum in Deutschland für die mineralischen Baustoffe wächst deutlich. Große Teilmassen bilden dabei Stoffe aus dem Gebäudeabriss. Gleichzeitig erreichen in Deutschland in den nächsten Jahren viele aktiven Deponien das Ende ihrer vorgesehenen Laufzeit. Weitere stehen kurz vor Erreichen ihres maximalen Deponievolumens. Die langen Genehmigungsverfahren für die Errichtung neuer Deponien lassen eine wachsende Deponieraumverknappung und z.T. eine heute schon wirtschaftlich spürbare Notsituation erkennen. Dies betrifft insbesondere Deponien der Klasse I. Hier besteht laut der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) ein „... erheblicher Bedarf an technisch geeignetem wie kostengünstigem Deponievolumen“.

Politische und rechtliche Situation in Deutschland

Erste Lösungen wurden bereits 1986 durch das Abfallgesetz (AbfG) angestrebt, indem dort neben der Beseitigung von Abfällen auch die Verwertung und ansatzweise die Vermeidung von Abfällen geregelt wurde. Mit der Neuregelung durch die Einführung der 3 Aufgabenfelder Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen durch das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz 1996 (KrW-/AbfG) wurde ein zentrales Bundesgesetz des Abfallrechts festgeschrieben. Die Verwertung von Recyclingbaustoffen wird außerdem im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG), der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV), dem Wasserhaushaltsgesetz

(WHG) und der Grundwasserverordnung (GrwV) behandelt. Begleitet werden diese gesetzlichen Rahmenbedingungen durch weitere Verordnungen als verbindliche Regelungen z.B. für den Umgang mit der Trennung von Abfällen, für die Verwendung mineralischer Recycling-Baustoffe (Recycling-Baustoffverordnung) oder für die Charakterisierung der Abfälle und die fachgerechte Deponierung nach dem Stand der Technik (Deponieverordnung DepV). Letztere regelt die grundlegende Charakterisierung des Abfalls und überträgt die Verantwortung dem Abfallerzeuger.

Ergänzend zum Regelwerk, damit ohne rechtsverbindlichen Charakter, aber ebenfalls Stand der Technik, ist das Merkblatt 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Es bildet die aktuelle Grundlage für die stoffliche Verwertung mineralischer Reststoffe und Abfälle (z.B. Bauschutt) durch Festlegung abfallspezifischer Anforderungen durch Feststoff- und Eluatwerte zum Schutz von Boden und Grundwasser. Diese sind für vorgesehene Verfüllungsmaßnahmen oder den Einsatz zu bautechnischen Zwecken abgeleitet worden. Je nach Schadstoffcharakteristik werden durch Einbauklassen mit den Zuordnungswerten Z0 bis Z2 stufenweise Einschränkungen hinsichtlich der Einbaustandorte und Einbauweisen festgelegt.

Mit der neuen, 3-teilig geplanten Mantelverordnung (MantelV) wird nun eine bundeseinheitliche Regelung zum Umgang (zur Verwertung) mit mineralischen Abfällen (u.a. Bauschutt) erwartet. Diese MantelV enthält als zweiten Teil eine Ersatzbaustoffverordnung. Darin sollen insbesondere im Sinne der §§ 4 Abs. 2 und 5 Abs. 2 KrW-/AbfG Anforderungen für mineralische Abfälle einschließlich von Aschen und Schlacken sowie industrielle Nebenprodukte, Baurecycling-Produkte und Bodenmaterial festgelegt werden. Im aktuellen Arbeitsentwurf sind darin 17 Klassen mineralischer Ersatzbaustoffe definiert.

Anzumerken sind aktuelle Abgrenzungen und Definitionen zur Begrifflichkeit des Abfalls. Während natürliche Böden, die nicht verunreinigt sind (max. 5 % Fremdstoffe) und nach dem Aushub im selben Baustellenbereich eingesetzt werden können, keinen Abfall darstellen, handelt es sich um Abfall, wenn dieser Aushub an anderen Stellen eingebaut wird und/oder verunreinigt ist (mehr als 5 % Fremdstoffe). Er ist dann gemäß seiner Zuordnung in eine Abfallart und Zuweisung einer Deponieklasse zu beseitigen/deponieren (Zuordnungswerte DepV, Tabelle 2, Anhang 3).

1.3 Einsatzmöglichkeiten für recycelte mineralische Baustoffe

Auf der Grundlage der Einstufung des Recyclingbaustoffes nach LAGA M 20, erfolgt

- der uneingeschränkte Einbau (Z 0),
- der eingeschränkte offener Einbau (Z 1.1 und Z 1.2) oder
- der eingeschränkte Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen (Z 2).

Nach LAGA M 20 wird auch der Einsatz der Recyclingbaustoffe für folgende Anwendungen empfohlen:

- als Unterbaumaterial im Straßen- und Wegebau,
- für befestigte Flächen in Industrie- und Gewerbegebieten (z.B. Parkplätze, Lagerflächen),
- für sonstige Verkehrsflächen (z.B. Flugplätze, Hafenbereiche, Güterverkehrszentren),
- in Erdbaumaßnahmen (Lärmschutzwälle, Straßendämme).

Nach den bundeseinheitlichen Qualitätsstandard 7-1 können andere geeignete Rekultivierungssubstrate eingesetzt werden, wenn natürliche Materialien nicht in ausreichender Menge vorhanden sind. Damit ist die Nutzung von Recyclingbaustoffen oder im erweiterten Sinn von technischen Substraten bautechnisch nahezu erschöpft.

2 Lösungsidee und methodischer Ansatz

2.1 Modifizierung mineralischer Stoffe – Erfahrungen

Die Bodenaufbereitung ist für ein Bauunternehmen nicht nur unter Umweltgesichtspunkten wegweisend, sondern stellt auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten oft kostengünstige Alternativen zur herkömmlichen Substitutionsbauweise dar. Es entstehen Kosten z. B. für die Wiederbeschaffung eines Ersatzbodens, für erforderliche Transporte oder Deponiegebühren. Diese Kosten sind sehr hoch und werden im Zuge der Ressourcenverknappung sogar perspektivisch noch steigen.

Methoden der gezielten Beeinflussung der bodenmechanischen Eigenschaften verfügbarer Böden und Mineralgemische gewinnen immer mehr an Bedeutung. Sie werden als flächige Stabilisierung oder im Zuge von Tiefenverbesserungsmaßnahmen eingesetzt. Empfehlungen und Richtlinien des Straßenbaus unterteilen den Begriff der Stabilisierung in Bodenverbesserung (der optimierten Einbaubedingung und Verdichtbarkeit), in Bodenverfestigung (der Erhöhung der Widerstandsfähigkeit und Tragfähigkeit) und in qualifizierte Bodenverbesserung (Bodenverbesserung mit erhöhten Anforderungen). Bei all diesen Maßnahmen werden Bindemittel wie Zemente, Kalkhydrate, Branntkalk und Mischbinder eingesetzt. Die Zugabemengen orientieren sich an der Korngrößenverteilung, den plastischen Eigenschaften und den Wassergehalten der zu behandelnden Materialien.

Der bautechnische Anreiz liegt in der Beeinflussung gemischtkörniger und feinkörniger Materialien. Es werden durch die Bindemittelgaben deren mechanische Eigenschaften wie z.B. Scherfestigkeit, Steifigkeit, Wasserdurchlässigkeit oder Schrumpfverhalten beeinflusst. Die Wirkungsweise von Bindemittelreaktionen ist wissenschaftlich noch nicht vollständig erklärbar. Es liegen bisher sehr komplexe Erfahrungen insbesondere in der Interaktion kleinster Partikel und unterschiedlicher Minerale mit diversen Bindemitteltypen vor. Wirkmechanismen von Böden mit Zementen und Kalken und die Anwendungsprinzipien wurden bislang umfangreich u.a. durch [2], [3] und [4] beschrieben.

Neben baupraktisch angewendeten Verfahren der Zustandsänderung der Materialien durch Entwässerung oder Verdichtung sind im Sinne einer Modifizierung technische Maßnahmen der Kornfraktionierung zu nennen. Durch Abtrennung grober oder Zumischung feiner Kornanteile können Zielkornverteilungen erreicht und mechanische Eigenschaften sehr wirkungsvoll verändert werden [5]. Die technische Umsetzung der Abtrennung grober Stoffanteile (Kornfraktionen, Wurzelanteile, Fremdstoffe) ist gängige Praxis von Bodenaufbereitungsanlagen. Die Aufbereitung erfolgte bis vor einigen Jahren für Steinbrüche und Kieswerke über die Abtrennung mehrerer Fraktionen über Siebanlagen, seit Anfang der 1990er Jahre sind auch mobile Anlagen im Einsatz (siehe Abb. 3). Die Zumischung feiner Anteile über Siebanlagen gelingt dagegen nicht optimal, da die mechanische Beanspruchung der Mischwerkzeuge hier vergleichsweise hoch ist. Praktisch finden die Verfahren zur Bodenaufbereitung durch Zumischung seit vielen Jahren flächenartig im Verkehrswegebau und bei der Herstellung größerer Flächen Verwendung. Die Verfahren der Bodenverbesserung/Stabilisierung werden dabei i. d. R. durch Bodenfräsen gelöst. Abweichend für kleinere Mengen finden auch Separatorschaufeln zunehmend Anwendung, u.a. auch im Tief- und Kanalbau.



Abbildung 3: Sternsieb 3-mtbc bei der Bodenaufbereitung, Deichinstandsetzung an der Neuen Luppe bei Leipzig

Eine weitere, intensive strukturelle Neuordnung des Materials wird durch ein Technologie-konzept der kurzzeitigen Konsistenzminderung durch massive Wasserzugabe und anschließender Stabilisierung durch gleichzeitiger Zugabe von Bindemitteln erreicht. Dieses seit ca. 25 Jahren als Flüssigboden-Verfahren im Rohr- und Kanalbau etablierte Konzept konnte mit wirtschaftlich interessanten Ansätzen in den letzten Jahren auch in anderen Anwendungsrichtungen erprobt und bestätigt werden [6]. Flüssigboden als Baustoff ist in vielen Labor- und Großversuchen untersucht worden, sichert die notwendige hochwertige Qualität und könnte bei material- und gerätespezifischer Anpassung bereits in den nächsten Jahren in unterschiedlicher Anwendungsgebieten zum Einsatz kommen [4]. Obwohl dabei effektiv Bestandmaterialien mit z.T. ungenügend vorliegenden Eigenschaften angepasst und damit wieder in den Stoffkreislauf eingeordnet werden können, sind im Umgang mit diesen Materialien auch Unsicherheiten insbesondere bezüglich der Qualitätsvorgaben und –prüfung entstanden, da an diesen „Recycling-Boden“ Anforderungen gestellt werden müssen, welche sich von den bisherigen Forderungen an das üblicherweise verwendete Material unterscheiden.

2.2 Herstellung technischer Substrate für Rekultivierungsschichten

Die gezielte Modifizierung oder Neuzusammensetzung bestehender mineralischer Massen als künstliches Rekultivierungssubstrat setzt die stoffliche Definition eines leistungsfähigen Mineralgemisches und die technische Realisierung der Aufbereitung voraus. Die technische Aufbereitung von mineralischen Massen zur Anpassung einzelner oder aller Kornfraktionen mit dem Ziel der Beeinflussung von Zielparametern, kann analog wie Mineralstoffgemische des Straßenbaus oder Deichbaus durch folgende Grundkonzepte erreicht werden:

- Aufbereitungsanlagen von mineralischen Stoffen insbesondere (Sortierung, Zerkleinerung, Siebung),
- stationäre Aufbereitungsanlagen oder

- mobile Aufbereitungsanlagen ohne immissionsschutzrechtlichen Genehmigungen.

Im Unterschied zum klassischen Erdbau ist die mindestens 1 m mächtige Rekultivierungsschicht auf Deponien „... immer im Zusammenwirken mit dem Bewuchs zu sehen“ [BQS 7-1] und hat damit auch dauerhaft wesentliche bodenbiologische Funktionen zu erfüllen. Besondere Aufgaben (Wasserhaushalt, Methanoxidation) können von Rekultivierungsschichten übernommen werden (siehe [BQS 7-2, 7-3]). Gemäß GDA-Empfehlung E. E 2-31 wird eine funktionierende Rekultivierungsschicht durch die folgenden mechanischen, biologischen oder chemischen Eigenschaften charakterisiert:

- ausreichende Mächtigkeit
- gute Durchwurzelbarkeit
- hohe nutzbare Feldkapazität und ausreichende Luftkapazität
- ausreichendes Infiltrationsvermögen und Unempfindlichkeit gegen Verschlammung
- ausreichende Durchlässigkeit zur Verhinderung von Stauwasserbildung
- Standsicherheit (in sich und im Verbund mit den anderen Systemkomponenten)
- Beständigkeit gegen alle Formen der Erosion (Wind, Wasser, innere und äußere Erosion, Suffosion, Kontakterosion)
- stabiles Korngerüst und Bodengefüge (nicht sackungs- oder lösungsgefährdet, wenig durchgängige Makroporen)
- geringes Lösungs- und Austragspotential von Stoffen
- Bereitstellung von Nährstoffgehalten, günstige Bodenreaktion und Pufferung

Neben geotechnischen Funktionen erfüllt die Rekultivierungsschicht somit hauptsächlich schützende Funktionen der abgedeckten Deponiekomponenten als Austrocknungs-, Frost- und Erosionsschutz oder als Wurzelhemmnis. Bezüglich der zusammenhängenden Betrachtung geotechnischer und bodenkundlicher Aspekte wird auf [7] verwiesen. Wichtige bodenkundliche Funktionen werden durch eine ausreichende nutzbare Feld- und Luftkapazität des Rekultivierungsmaterials sichergestellt.

Stehen geeignete natürliche Böden nicht oder nicht in ausreichender Menge zur Herstellung der Rekultivierungsschicht zur Verfügung, „... können auch andere geeignete Rekultivierungssubstrate eingesetzt werden“[8]. Im Falle der Verwendung von Deponieersatzbaustoffen sind dann die Anforderungen der §§ 14-17 DepV maßgebend. Im Sinne des Bodenschutzes ist bei der Herstellung dieser technischen Substrate für Rekultivierungsschichten immer der ressourcenschonenden Lösungen der Vorzug zu geben. Dabei kann durch Aufbereitung ungeeigneter Materialien (infolge gestörter bodenkundlicher Funktion) neues Substrat oder Mischsubstrat mit geeigneten nutzbaren Feld- und Luftkapazitäten bereitgestellt werden.

3 Vorstellung erster Ergebnisse aus Mischversuchen

3.1 Beschreibung der Ausgangsstoffe

Erste Untersuchungen fanden an frisch abgelegten und bereits entmischten Haufwerken eines Abbruchmaterials mit hohem Ziegelanteil eines Deponiestandes in Sachsen statt (siehe Abb. 4, 5). Es handelte sich dabei um ein gebrochenes Material der Fraktion 0/63.



Abbildung 4: Halde aus 0/63 mm Ziegel-RC mit frisch abgeladenen Material links und älteren Material rechts

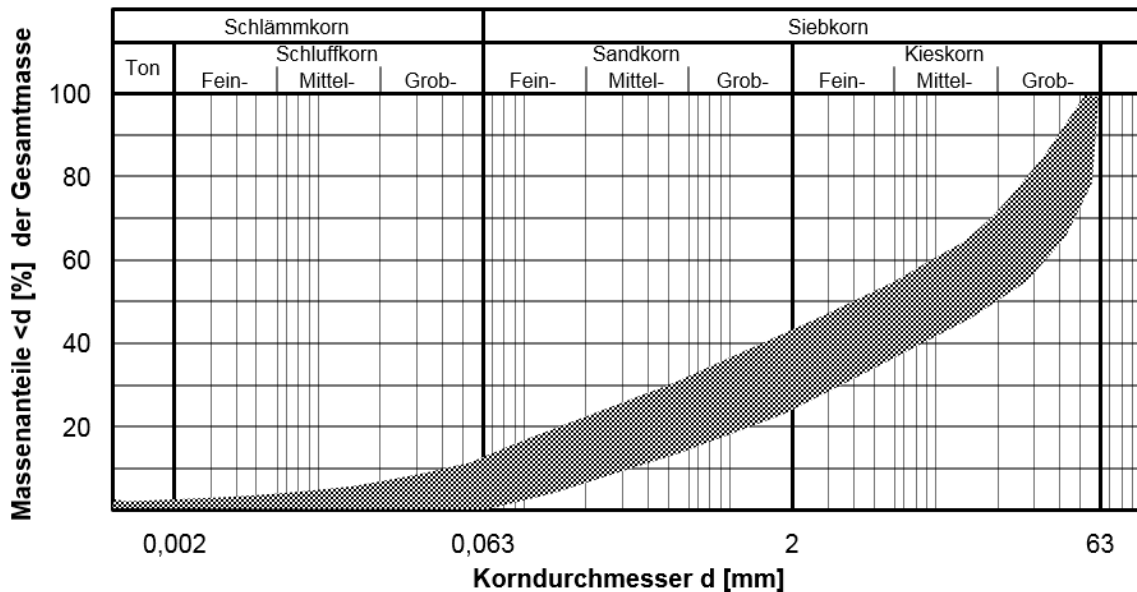


Abbildung 5: Stoffanteile der Einzelfractionen des Untersuchungsmaterials

Nach DIN 4022 ist dieses Abbruchmaterial in seiner Gesamtmasse als Kies, sandig, schwach schluffig (G,s,mu') und nach DIN EN ISO 14688 als Kies, sandig, schwach schluffig (sisaGr) zu benennen. Die Krümmungszahl CC wurde mit 1,2 und die Ungleichförmigkeitszahl CU mit ca. 250 bestimmt. In der Klassifikation für Böden nach DIN 18196 ergibt sich ein A, für Böden ein GU mit der Annahme von für natürliche Gesteinskörnungen typischer sehr großer Scherfestigkeit, guter Verdichtungsfähigkeit, vernachlässigbar kleiner Zusammendrückbarkeit, mittlerer Wasserdurchlässigkeit und Frostempfindlichkeit.

Neben den Hauptbestandteilen dieser Abbruchmasse von Ziegel-/Klinker-, Kunst-, Natur-

stein und Mörtel fanden sich auch Nebenbestandteile wie Holz, Metall, Kunststoffe, Schlacke, Keramik u.a. mit ca. 5 M.-%. Organische Bestandteile waren vor allem in der Fraktion > 2 mm in Form von Holz und einem Anteil < 0,5 M.-% (schwach organisch) nachweisbar (siehe Abb. 6). Die Hauptmasse bildet der Ziegel- und Klinkerbruch¹ unterschiedlicher Farbnuancen mit ca. 35 M.-%.

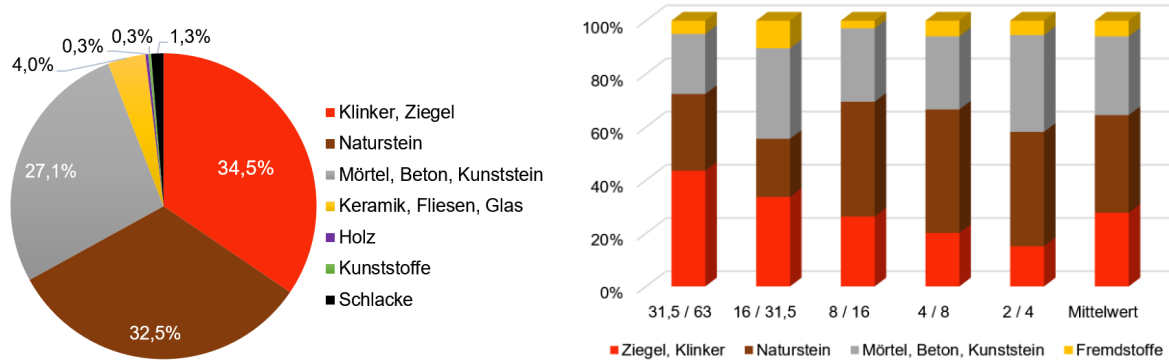


Abbildung 6: Stoffanteile im Abbruchmaterial, gesamt und pro Fraktion

Nach erster Einschätzung wird dem vorliegenden Abbruchmaterial eine gute geotechnische Eignung im Einsatz als Rekultivierungsschicht zugewiesen. Bodenmechanische Kenngrößen (siehe Tab. 1) liegen in den Zielbereichen für natürliche Böden.

Tabelle 1: Tabellen- und Messwerte bodenmechanischer Kenngrößen des Abbruchmaterials

| Parameter | Symbol | Einheit | Tabellen-/Literaturwert | Messwert |
|--------------------------|--------------|-------------------|---|--------------------|
| Wasserdurchlässigkeit | k | m/s | 1×10^{-4} bis 1×10^{-6} | 7×10^{-5} |
| Wassergehalt | w | M.-% | 11,0...13,7 | 4,9...20,5 |
| wirksamer Reibungswinkel | φ' | Grad | 35,0...37,5 | n.b. |
| eff. wirksame Kohäsion | c' | kN/m ² | 0 | n.b. |
| Korndichte | ρ_s | g/cm ³ | 2,6...2,8 | 2,75 |
| Rohdichte | ρ_{Roh} | g/cm ³ | 2,4...2,8 | 2,5...2,7 |
| Schüttdichte | ρ_{Sch} | g/cm ³ | 1,1...1,5 | 1,45 |
| Proctordichte | ρ_{Pr} | g/cm ³ | k.A. | 1,7 |
| optimaler Wassergehalt | w_{opt} | M.-% | k.A. | 18 |
| Krümmungszahl | C_C | - | k.A. | 1,2 |
| Ungleichförmigkeitszahl | C_U | - | 200...300 | 247 |
| Kalkgehalt | - | M.-% | > 5 % (stark kalkhaltig) | > 5 % |

Es ist jedoch anzumerken, dass die mechanische Schwachstelle des Baustoffes im Stoffanteil Klinker/Ziegel zu sehen ist. Hinweise ergeben sich aus den schwer zu ermittelnden Proctordichten, da die Ausführung nach DIN 18127 zur Kornzertrümmerung und damit fehlerhafter (erhöhter) Proctordichten im Versuch führt. Weitaus wichtiger ist jedoch die Erfassung der bodenkundlichen Funktion des Substrates und dort insbesondere des Klinker-/Ziegelanteils infolge seiner porösen Gesamtstruktur. Nachfolgende Überlegungen liegen daher im Fokus einer generellen Einschätzung der Wirkungsweise dieses Stoffanteils.

3.2 Porengrößen in den Stoffanteilen

Für die im Material vorliegenden Stoffanteile lassen sich aus der Literatur sehr unterschiedliche Porositäten angeben. Während Naturstein typischerweise lediglich eine Porosität von 0,2

¹Durch unterschiedlich hohe Brenntemperaturen bei der Herstellung werden Ziegelwaren (900 – 1100 °C) oder Steinzeug, Klinker (1150 – 1300 °C) erzeugt. Die bautechnischen Eigenschaften dieser Materialien unterscheiden sich aufgrund ihrer Festigkeit und ihres Porenanteils.

bis 1,5 Vol.-% im Bereich der Kapillarporen aufweist, liegen die Porositäten von Betonbruch bei 1-3 Vol.-% Luftporen, 4-6 Vol.-% Gelporen und 10-12 Vol.-% Kapillarporen. Die Volumenanteile der Kapillarporen von Ziegel sind mit 20-50 Vol.-%, für Klinker aufgrund seiner hohen Brenntemperaturen und Verschmelzungsprozesse nur noch mit 5-10 Vol.-% hinterlegt. Unter Berücksichtigung der untersuchten Stoffanteile im Haufwerk (siehe Abb. 6) wurde in einer ersten Abschätzung von ca. 10-20 Vol.-% im Bereich der Kapillarporen ausgegangen.

Es wurden außerdem rasterelektronische Untersuchungen im Leichtvakuum nach Kohlenstoffbedampfung von Kleinstproben von ca. 1-5 mm² des Ziegel- und Klinkeranteils in einem „environmental scanning electron microscope“ (ESEM) ausgeführt. Abb. 7 zeigt an unterschiedlichen Proben in unterschiedlichen Nahbereichen des Elektronenstrahls Strukturen. Auf dieser Grundlage sind die im Folgenden zusammengestellten Aussagen abgeleitet worden. Auch nach dem Brennvorgang und an den alten Bruchflächen der Ziegelproben können Tonmineralstrukturen mit interpartikulären Poren im Bereich kleiner Mittel- und Feinporen nachgewiesen werden (o.l.). Im gleichen Material wurden in allen untersuchten Teilstücken repräsentative Großverteilungen von Mittelporen bis ca. 10 μm dokumentiert (o.r.). Dagegen zeigen sich vereinzelt deutliche Sinterstrukturen durch hochtemperierte Aufschmelzprozesse und wenige, größere Strukturbrüche im Bereich von Grobporen (u.l.).

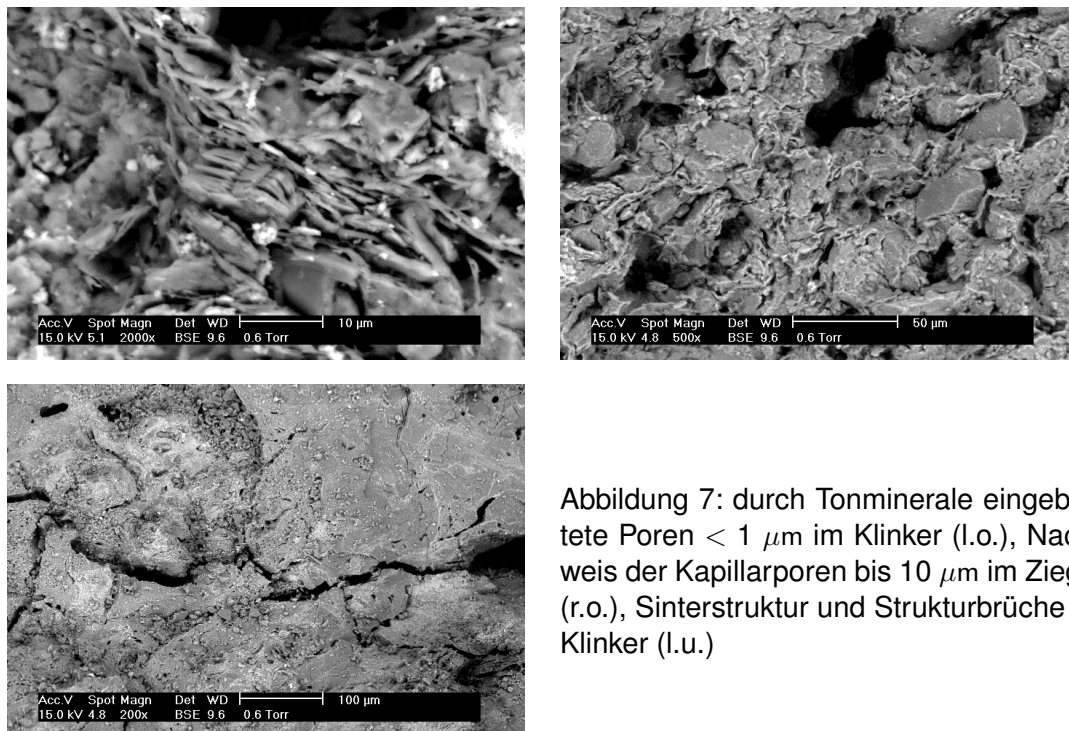


Abbildung 7: durch Tonminerale eingebettete Poren < 1 μm im Klinker (l.o.), Nachweis der Kapillarporen bis 10 μm im Ziegel (r.o.), Sinterstruktur und Strukturbrüche im Klinker (l.u.)

Diese ersten Aussagen zur Abschätzung des zu erwartenden Porenraumes in der Teilstoffmenge Ziegel/Klinker und des Erwartungswerts der damit verbundenen nutzbaren Feldkapazität des Gesamtsubstrates in seiner unverbesserten Qualität konnten durch das Verfahren der Quecksilberporosimetrie gewonnen werden. Dabei wird Quecksilber unter hohem Druck in alle Porengrößen des Ziegel-/Klinkermaterials gepresst und die Porengröße als Funktion des äußeren Systemdruckes bestimmt. Es können für zwei Mörtel- und je eine Klinker- und Ziegelprobe die Porengrößenverteilung angegeben werden (siehe Abb. 8). Für den Ziegelanteil bestätigen sich die Aussagen aus den ESEM-Untersuchungen, wobei nun das Vorliegen des Porenanteils hauptsächlich für den Bereich von 0,1 bis 5 μm (Maximum bei ca. 0,4 μm) präzisiert werden kann. Ähnliches Bild zeigt sich auch für die Klinkerprobe (0,3 bis 7 μm, Maximum bei ca. 4 μm). Im rechten Diagrammausschnitt lassen sich auch größere Strukturbrüche, evtl. bereits im Zuge des Abkühlprozesses nach dem Brennvorgang entstanden, erkennen.

Die maßgeblichen Porenanteile sollten demnach im Stoffanteil Ziegel/Klinker im optimalen Bereich nutzbarer Feldkapazitäten liegen, pflanzlich nicht nutzbares Haftwasser mit Matrixpotenzialen über 15.000 hPa sind in den Mörtel- (und Beton-)anteile zu finden. Das aus strukturellen Mesobrüchen oder schnell bewegliche Wasser kennzeichnet die Luftkapazität.

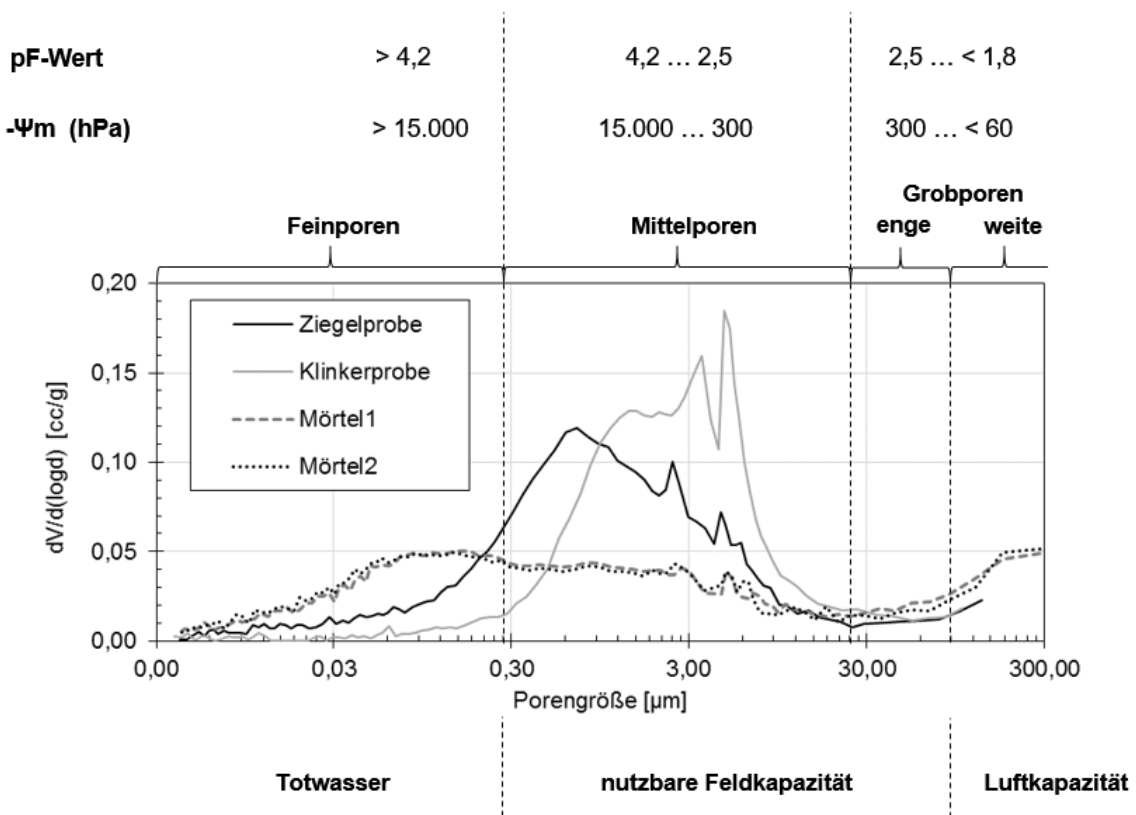


Abbildung 8: Porenverteilung in den Stoffanteilen des Untersuchungsmaterials

3.3 Herstellung des Substrats

Nach den vorliegenden Ergebnissen ergab sich ein zusätzlicher Handlungsbedarf für weitere Experimente zur Erfassung der bodenkundlichen Funktion des Abbruchmaterials. Hinsichtlich der Verbesserung der strukturellen Verzahnung im Sinne einer leichten Anhebung des Reibungswinkels, der Einstellung einer effektiven Kohäsion und der Minimierung der Wasserdurchlässigkeit eines künstlichen Rekultivierungssubstrates ist das vorliegende Bauschuttgemisch durch einen Anteil eines natürlichen Bodens mit erhöhten Feinanteilen < 0,063 mm und einer weitgehend identischen Ungleichförmigkeit CU wie die aktuellen Grobanteile zu mischen. Im weiteren Schritt müssen dann notwendige bodenkundliche Funktionen durch Beimischung geringer Anteile organischer Masse und evtl. notwendiger Zusatzkomponenten hergestellt werden (Abb. 9).



Abbildung 9: Substratanteile der künstlichen Rekultivierungsschicht

In ersten Laborversuchen zur Substratherstellung und -optimierung wurde neben dem bisher untersuchten Rohmaterial ein Zumischboden (Sand, Feinkies) mit 20 M.-% Feinanteil im Verhältnis 80/20 (80 % Abbruch, 20 % Zumischboden) verwendet. Die Kornverteilungen der beiden Mischungsanteile und des so hergestellten geotechnischen Substrates sind in Abb. 10 dargestellt. Der optische Eindruck einer Handmischung wird als qualitativ gut und im Rahmen bekannter technologischer Verfahren als praktisch umsetzbar eingeschätzt.

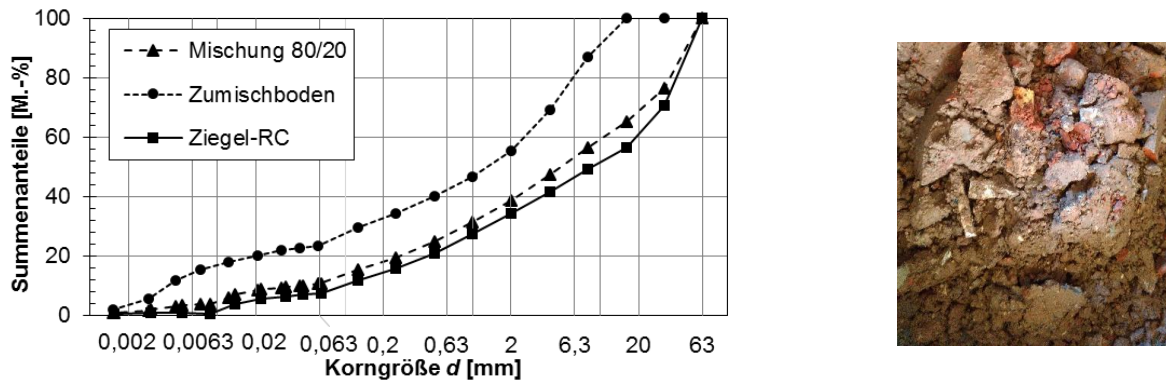


Abbildung 10: Kornsummenverteilungen der Mischungsanteile des Abbruchmaterials und des Mischsubstrates 80/20 (links) und Aufnahme des Mischsubstrates (rechts)

3.4 Luft- und Feldkapazität des Roh- und Mischsubstrates

Zur Erfassung der hydraulischen Verfügbarkeit des Bodenwassers aus den beiden untersuchten Substraten wurde der Zusammenhang zwischen der Wasserspannung und dem volumetrischen Wassergehalt des künstlichen Substrates untersucht. Dieser hängt u.a. von der Porengrößenverteilung und wird nachfolgend näher betrachtet.

Tabelle 2: Definition der Kennwerte zum Wasser- und Luftgehalt des Bodens nach DIN 4220 Abschn. 5.2.12.1

| | | | | |
|--|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Wasserspannung $-\Psi_m$ (hPa) | < 60 | 60 bis < 300 | 300 bis < 15 000 | $\geq 15 000$ |
| pF-Wert = $\lg -\Psi_m$ | < 1,8 | 1,8 bis < 2,5 | 2,5 bis < 4,2 | $\geq 4,2$ |
| Porenäquivalent (μm) | > 50 | 50 bis > 10 | 10 bis > 0,2 | $\leq 0,2$ |
| Porenart | weite Grobporen | enge Grobporen | Mittelporen | Feinporen |
| Bodenwasser | schnell bewegliches Sickerwasser | langsam bewegliches Sickerwasser | pflanzenverfügbares Haftwasser | nicht pflanzenverfügbares Haftwasser |
| Kennwerte | Luftkapazität | nutzbare Feldkapazität | | Totwasser |
| | | Feldkapazität | | |
| Gesamtporenvolumen | | | | |
| ANMERKUNG: Porenäquivalent (auch Äquivalentdurchmesser) = Innendurchmesser einer Glaskapillare mit gleicher Boden-Saugspannung | | | | |

In der Begrifflichkeit der Feldkapazität (FK) wird hier dem allgemein festgelegten Wert des Volumenanteils des Bodenwassers das in Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser $\leq 50 \mu\text{m}$ bzw. bei einer Saugspannung von $\text{pF} < 1,8$ gebunden ist, gefolgt. Als Luftkapazität (LK) gilt der Volumenanteil der Poren im Boden, welcher bei einer Feldkapazität von $\text{pF} = 1,8$ mit Luft gefüllt ist. Die dabei mit Luft gefüllten Poren haben einen Äquivalenzdurchmesser von $> 50 \mu\text{m}$. Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist der Volumenanteil Wasser das in den Poren mit einem Äquivalenzdurchmesser von 0,2 bis $50 \mu\text{m}$ enthalten ist. Das entspricht einer Saugspannung pF von 1,8 bis 4,2 (siehe Tab. 2).

Abweichend von der normativen Regelung zur Ermittlung des Wasserrückhaltevermögens nach DIN EN ISO 11274 wurde die nutzbare Feldkapazität der Substrate (unverbessert und Mischung 80/20) über den alternativen Ansatz der Verdunstung des pflanzenverfügbaren Wassers bestimmt. Dieser war erforderlich, da nach der Norm eine Abtrennung des Überkorns (> 2,00 mm) erforderlich ist. Für den untersuchten Fall wäre ein Anteil von ca. 60 % abzutrennen. Die zu entfernenden Körnungsbereiche betreffen in diesem Fall hauptsächlich den Ziegelbruch. Im Folgenden werden die Teilschritte der Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens vorgestellt:

- Einbau des homogenisierten, vorgefeuchteten (1 d) Substrates (ca. 10 kg) mit der Zieleinbaudichte im Versuchsbehälter
- langsame Wassersättigung von unten nach oben und Massenermittlung
- Drainage von „schnell beweglichem“ Wasseranteil, Massenermittlung des Substrates mit dem Porenwasser
- Entfernung des (pflanzenverfügbaren) Porenwassers durch Trocknung bei 40 °C
- Bestimmung der Trockenmasse durch Trocknung bei 105 °C, Bestimmung der Porenwassermenge bei Sättigung und Drainage, Ermittlung von Porenvolumen, Luft- und Feldkapazität

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse sind als vorläufig zu betrachten und werden im Weiteren mit Hilfe genormter Verfahren geprüft.

Tabelle 3: Wasserrückhaltevermögen des Abbruchmaterials und Mischsubstrats (80/20)

| Substrat unverbessert | | Substrat 80/20 | |
|------------------------------|--------|-----------------------|--------|
| • Gesamtporenanteil: | 45,8 % | • Gesamtporenanteil: | 36,8 % |
| • LK: | 14,3 % | • LK: | 3,9 % |
| • FK: | 31,5 % | • FK: | 29,9 % |
| • nFK: | 25,7 % | • nFK: | 27,4 % |
| • Totwasser: | 5,8 % | • Totwasser: | 2,5 % |

In der zeitlichen Änderung des vol. Wassergehaltes des Mischsubstrats 80/20 (dargestellt 4 Einzelversuche sowie der arithmetische Mittelwert) ist für den Zeitpunkt von 40 h nach dem Drainagevorgang der als maßgeblich eingeschätzte Wasserverlust von ca. 16 % (bez. auf die Trockenmasse) gekennzeichnet (Abb. 11). Abb. 12 zeigt analog die sich im selben Zeitraum entwickelnde nutzbare Feldkapazität von ca. 27 Vol.-%.

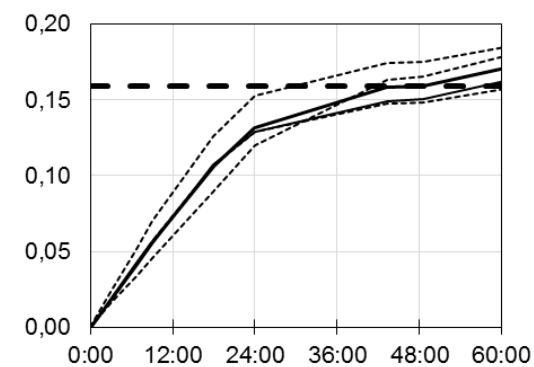


Abbildung 11: Wasserverlust am Mischsubstrat bez. auf die TM (M.-%)

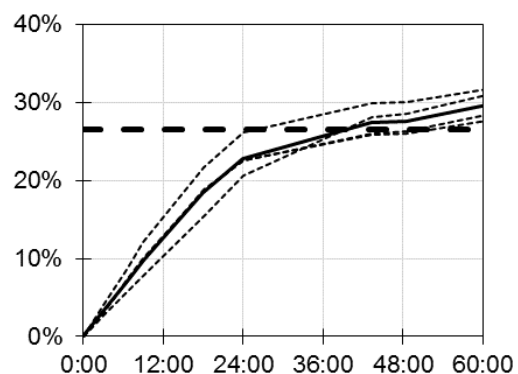


Abbildung 12: nutzbare Feldkapazität nach ca. 40 h (in Vol.-%)

4 Ergebnisbewertung, Fazit, Ausblick

Im Sinne der aktuellen Regelwerke zur Schonung natürlicher Ressourcen und wirtschaftlicher Anreize einer erneuten Nutzung bereits vorliegender mineralischer Restmassen auf Deponien sollten die aktuellen Deponierungsmengen intensiver hinsichtlich der Nutzung als Baustoff oder einer Modifikation zum Einsatz auf neuen Anwendungsfeldern geprüft werden.

Es zeigt sich in den vorliegenden Untersuchungen, dass mineralische Abbruchmassen mit hohen Ziegelanteilen prinzipiell geeignet sind, die geotechnisch geforderten Funktionen einer Rekultivierungsschicht auf Deponien zu erfüllen. Verbesserungen/Anpassungen von grenzwertig eingehaltenen Parametern können durch die Bodenverbesserungsansätze des Erdbaus und moderne technologische Ansätze von Kornfraktionstrennung, -neuordnung oder -zumischung erreicht werden.

Darüber hinaus zeigen erste Tastversuche am Ziegel/Klinkeranteil und an Mischsubstraten mit natürlichen Böden, dass wesentliche Anforderungen an Rekultivierungsschichten erfüllt werden können. Die Eigenschaften modifizierten Abbruchmaterials mit hohen Ziegelanteilen lassen sich gezielt positiv beeinflussen und damit die wertvolle Bodenfunktion auch mit technischen Substraten erreichen.

Aufbauend auf diesen ersten Erkenntnissen sind weitere Untersuchungen am Material in seiner typisch vorliegenden Ablagerungsbandbreite erforderlich. Neben den in einer ersten Stufe erfassten wasserhaushaltlichen Größen müssen dann auch bodenbiologische Langzeitfunktionen geprüft und in Eignungsprüfungen im Großmaßstab über Probefelder belegt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Bericht zur Rohstoffsituation in Deutschland 2014, Hannover*
- [2] WITT, K. J.: *Zement–Kalk–Stabilisierung von Böden. In Geotechnik Seminar, Weimar. 2002*
- [3] DAMASCHKE, A. ; WITT, K. J. ; T., Arndt. ; WUTTKE, F.: *Stabilisierungseffekte verschiedener Bindemittel bei der Bodenbehandlung, Update Bodenbehandlung mit Bindemitteln, 20.01.2015 Kassel*
- [4] SCHADE, H.-W.: *Theorie und Praxis von Eignungsprüfungen für die Bodenbehandlung, 10. GGB-Fachtagung, Kassel. 2015*
- [5] SANDIG, F. ; FOHGRUB, J.: *Bodenaufbereitung von bindigen Böden mit Sternsieberanlagen, Vortrag 9. Erdbaufachtagung Leipzig. 2013*
- [6] SANDIG, F. ; THIELE, R.: *Flüssigboden als Alternativmaterial für den Deichbau, Vortrag 9. Erdbaufachtagung Leipzig. 2013*
- [7] AL-AKEL, S. ; ENGEL, J. ; LAUER, C. ; MÜLLER, M. ; BAUMERT, R. ; SCHOENHERR, J. I.: *Zusammenhängende Betrachtung geotechnischer und bodenkundlicher Aspekte bei der Planung von qualifizierten Rekultivierungsschichten. Deponieworkshop Zittau-Liberec 2007 – Einsatzgrenzen, Sanierung und Wirtschaftlichkeit von Deponiesicherungsvarianten. Tagungsband, Heft 96 der Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Zittau/Görlitz, ISBN 978-3-9811021-6-1. 2007*
- [8] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“: *Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 7-1, Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen. 2015*
- [9] BUNDESREGIERUNG: *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.2.2012. Berlin. 2012*
- [10] KOMMISSION, Europäische: *Mitteilung zum effizienten Ressourceneinsatz im Gebäudesektor. COM(2014) 445 final*
- [11] *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) in der Fassung vom 22.5.2013 mit Berichtigung vom 7.10.2013*
- [12] *GDA-Empfehlung, E. E 2-31 (2000): Rekultivierungsschichten (Entwurf). Wasserhaushalt der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien und Altlasten (Hrsg.: H.-G. Ramke, K. Berger, K. Stief), Hamburger Bodenkundliche Arbeiten, 47, 275-293*
- [13] KOPP, J. C. ; ALISCH, O.: *Verfügbarkeit von Rohstoffen in Deutschland – Argumente für eine stärkere Nutzung eigener Rohstoffressourcen. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, 120(2014), 71–79. 2014*

- [14] MITTEILUNGEN DER LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (LAGA): *Merkblatt M 20, Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln - (Stand: 06.11.1997), Erich Schmidt Verlag, Berlin*
- [15] RÖTH, D.: *Einsatzpotentiale von mineralischen Baustoffen in Theorie und Praxis. Müll und Abfall, 10(15), 559*
- [16] SANDIG, F.: *Strukturbedingte geotechnische Eigenschaften von Controlled Low Strength Material für Dichtungen in Deichen. Bauhaus-Universitätsverlag Weimar. 2015*
- [17] *Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (MantelIV), 3. Arbeitsentwurf, (Stand: 23.07.2015)*

